

自動運転車市場向けの フォトニクスガイド

スワヴォミール・ピョンテク、ジェイク・リー

ライダとそれに競合するセンサ技術(カメラ、レーダー、超音波)によって、センサフュージョンに加え、光検出器・光源・MEMSミラーを慎重に選択することの必要性はさらに高まっている。

センサ技術、画像処理、レーダー、ライダ(LiDAR: light detection and ranging)、エレクトロニクス、そして人工知能の進歩によって、衝突回避、ブラインドスポットモニタリング(BSM)、車線逸脱警告、駐車支援を含む、数十種類もの先進運転支援システム(ADAS: Advanced Driver Assistance System)が実現されている。センサフュージョンを通じてこうしたシステムの動作を同期することにより、完全自律走行の自動運転車は、周囲をモニタリングして、道路障害物の可能性を運転者に警告したり、さらには衝突を防ぐための回避策を運転者とは独立して講じたりすることができる。

自動運転車は、高速走行時に前方の物体を区別して認識する必要もある。測距技術を利用して、最大約100mまでの範囲の3次元(3D)マップを迅速に構築し、最大250m離れた位置の高角分解能画像を作成しなければならない。また運転者が搭乗しない場合は、車両の人工知能によって最適な判断を行う必要がある。

これを行うための複数の基本的手法の1つは、自動運転車からのエネルギーパルスが対象物で反射して車両に返ってくるまでの往復ToF(Time of Flight)を測定するものである。大気中のパルス速度がわかれば、反射点までの距離が計算できる。パルスは、超

音波(ソナー)、電波(レーダー)、光波(ライダ)のいずれでもよい。

この3つのToF手法のうち、角分解能の高い画像を得るには、ライダが最良の選択肢である。回折(ビーム分散)が小さいことから、隣接する物体を認識する能力がレーダーよりも高い(図1)。高い角分解能は、特に高速時に、正面衝突などの潜在的危険性に反応するための十分な時間を設ける上で重要になる。

レーザ源の選択

ToFライダでは、レーザから持続時間 τ の光パルスが放射され、放射の瞬間にタイミング回路の内部クロックが起動される(図2)。対象物で反射した光パルスが光検出器に到達すると、クロックを停止する電気出力が生成される。こうして電子的に測定された往復ToFである Δt から、反射点までの距離 R を計算することができる。

レーザと光検出器が実際に同じ位置

にあるとすると、距離は次の式で求められる。

$$R = \frac{1}{2n} c \Delta t$$

ここで、 c は真空中の光速、 n は伝搬媒体の屈折率(空気の場合は約1)である。レーザのスポット径が、解像対象物のサイズよりも大きい場合、距離分解能 ΔR に影響を与える要素は、 Δt を測定する際の不確かさ $\delta \Delta t$ と、パルスの空間幅($w = c \tau$)の2つである。

最初の要素の影響は $\Delta R = \frac{1}{2} c \delta \Delta t$ で表され、2つめの要素の影響は $\Delta R = \frac{1}{2} w = \frac{1}{2} c \tau$ で表される。分解能5cmで距離を測定する場合、これらの関係式からそれぞれ、 $\delta \Delta t$ は約300ps、 τ は約300psとなる。ToFライダでは、($\delta \Delta t$ の最大の寄与要因である)時間ジッタが小さい光検出器と検出電子部品に加え、比較的高価なピコ秒レーザなど、持続時間の短いパルスを放射可能なレーザが必要である。標準的な車載ライダシステムに使われるレーザは、持続時間が約4nsのパルスを生成するため、ビーム分散が最小限であることが不可欠となる。

車載ライダシステムを設計する際の

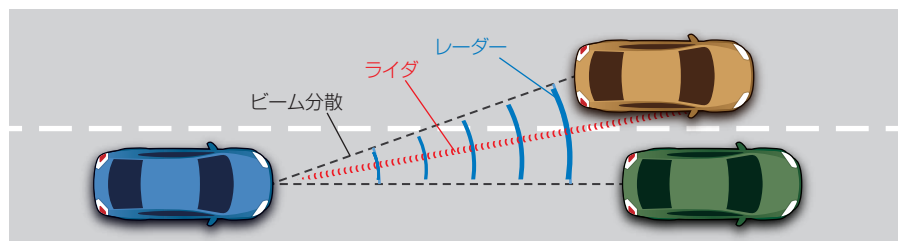


図1 ビーム分散は、放射アンテナ(レーダー)またはレンズ(ライダ)の波長と開口径の比率に依存する。ビーム分散の大きいレーダーの方がこの比率が大きいため、角分解能は小さくなる。この図において、レーダー(黒色)は2台の自動車を区別できないが、ライダ(赤色)は両者を区別する。

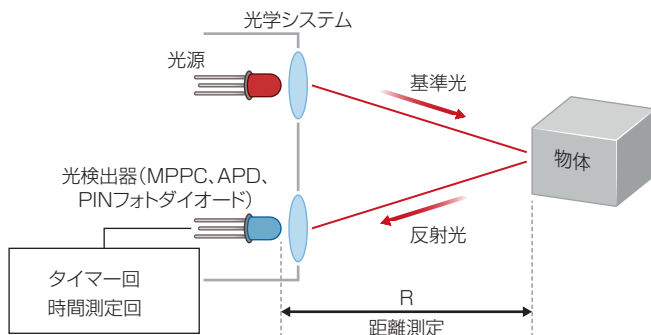


図2 ToFライダの基本設定の詳細図。

最も重要な選択の1つが光波長である。人間の視覚に対する安全性、大気との相互作用、レーザの入手可能性、光検出器の入手可能性という、複数の要因がこの選択に制約を与える。

最もよく使われる2つの波長は、905nmと1550nmである。905nmの最大のメリットは、シリコンがこの波長の光子を吸収し、シリコンベースの光検出器は、1550nmの光を検出するために必要なInGaAs(インジウムガリウム砒素)の赤外線(IR:infrared)光検出器よりもコストが低いことである。しかし、1550nmのほうが人間の視覚に対する安全性が高く、パルスあたりの放射エネルギーがより高いレーザを使用できるという、光子数の面で重要な性質を持つ。

(あらゆる天候条件下での)大気減衰、空中浮遊粒子による散乱、対象物表面からの反射は、波長に依存する。天候条件や反射面の種類には無数の可能性があるため、これは、車載ライダにおける複雑な問題である。ほとんどの現実的な設定の下で、905nmのほうが光損失が低い。905nmよりも1550nmのほうが水に対する吸収率が高いためである⁽¹⁾。

光子検出の選択肢

光検出器のアクティブ領域に到達するのは、1つのパルスで放射される光

子のうちのほんの一部である。大気減衰がパルスの経路に沿って変動せず、レーザ光のビーム分散が無視でき、照射スポットが対象物よりも小さく、入射角がゼロで、反射がランバート反射である場合、受光ピークパワー $P(R)$ は次の式で求められる。

$$R(R)=P_0\rho\frac{A_0}{\pi R^2}\eta_e \quad (-)$$

ここで、 P_0 は放射レーザパルスの光ピークパワー、 ρ は対象物の反射率、 A_0 は受光器の開口部面積、 η_e は検出光学部品の分光透過率、 γ は大気消散係数である。

この式は、距離 R の増加とともに受光パワーが急激に低下することを示している。各パラメータとして適度な値を選択し、 $R=100\text{m}$ とすると、放射される光子の数は一般的に 10^{20} を超えるのに対し、検出器のアクティブ領域に返ってくる光子の数は数百から数千個程度となる。また、これらの光子とともに、何の有用な情報も持たないバックグラウンド光子も検出される。

狭帯域フィルタを使用することにより、検出器に到達するバックグラウンド光の量を減らすことはできるが、ゼロにすることはできない。バックグラウンドの影響として、検出ダイナミックレンジが低下し、ノイズ(バックグラウンド光子のショットノイズ)が高くなる。ここで注目すべき点として、標準的な

条件下での地上の太陽放射照度は、1550nmのほうが905nmよりも低い。

自動車を取り巻く $360^\circ \times 20^\circ$ の範囲全体の3Dマップを作成するには、ラスタースキャン型のレーザビームまたは複数のビームを使用するか、あるいは、広範囲に光を照射して返ってくるデータのポイントクラウドを収集することが必要になる。前者はスキャニングライダ、後者はフラッシュライダと呼ばれる手法である。

スキャニングライダには、複数の方法がある。最初の方法は、米ベロダイン社(Velodyne)によって実証されたもので、ルーフに取り付けられたライダプラットフォームが $300 \sim 900\text{rpm}$ で回転しながら、64個の905nmのレーザダイオードからパルスを放射する。各ビームに対し、専用のアバランシェフォトダイオード(APD:avalanche photodiode)検出器がある。類似の方法で、パルスの個々のビームを異なる方位角と偏角に向けるために各面の傾斜角が少しずつずれた、回転多面鏡を使用するものもある。どちらの設計も、機械的に険しい走行環境では、可動部に故障の危険性がある。

2つめは、よりコンパクトにスキャニングライダを実装する方法で、微小なMEMS(microelectromechanical system)ミラーを使用して、1つ以上のビームを2次元方向に電気的に指向する。厳密にはやはり可動部(振動ミラー)が存在するが、振動の振幅が小さく、周波数が高いので、MEMSミラーと車両の間の機械的共振は生じない。しかし、ミラーの形状が制限されることからその振動振幅が制約され、その結果、視野が制約されてしまうことが、このMEMS手法の欠点である。それでも、コストが低く、実証された技術であるため、この手法に対する関

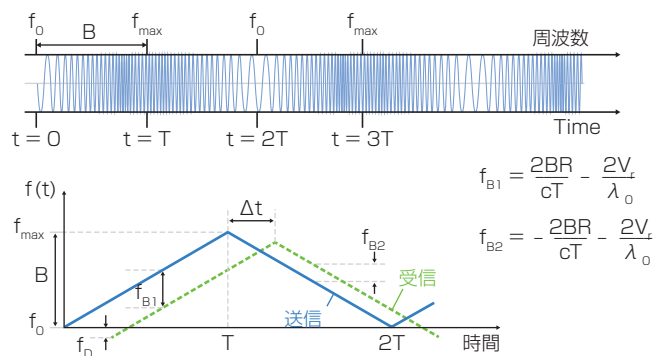


図3 チャープ式レーダーでは、 f_{B1} と f_{B2} を電子的に測定することにより、反射物体までの距離とその視線速度を求めることができる。

心は高まっている。

3つめの有力なスキャニングライダ手法である光フェーズドアレイ (OPA: Optical Phased Array) は、信頼性の高い「可動部なし」の設計で人気を集めている。コヒーレントな光によって均等に照らされた光アンテナ要素のアレイで構成される。ビームステアリングは、各要素によって再放射された光の位相と振幅を個別に制御することによって達成される。遠視野干渉によって、1つのビームから複数のビームへの望ましい照射パターンが生成される。残念ながら、さまざまなOPAコンポーネントにおける光損失によって、有効なレンジが制限される。

フラッシュライダは、広範囲に光を照射するが、その照射範囲は検出器の視野と一致する。検出器は、検出光学部品の焦点面におけるAPDのアレイである。各APDが個別に、そのAPD上に撮像された対象物体までのToFを測定する。完全に「可動部なし」の手法で、2D検出器のピクセルサイズによって接線方向の分解能が制限される。

しかし、フラッシュライダには、光子数の面で大きな欠点がある。距離が数十メートルを超えると、返ってくる光量があまりにも少なく、信頼性の高い検出ができない。広範囲に光子を照

射する代わりに、構造化された光(格子状に並んだポイント)で照射すれば、接線方向分解能を落とすことによって光子数を増やすことができる。垂直共振器面発光レーザー (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser) を使用すれば、数千のビームを異なる方向に同時に照射するプロジェクターを構成することができる。

ToFの限界を超える手法

ToFライダは、返ってくるパルスが弱く検出電子部品の帯域幅が広いために、ノイズの影響を受けやすく、また、しきい値のトリガによって Δt の測定に誤差が生じる可能性がある。こうした理由から、周波数変調連続波 (FMCW: Frequency Modulated Continuous Wave) ライダが興味深い代替策となっている。

FMCWレーダーまたはチャープ式レーダーでは、周波数変調された電波をアンテナが連続的に放射する。たとえば、時間 T をかけて周波数を f_0 から f_{max} まで線形的に増加させてから、時間 T をかけて f_{max} から f_0 まで線形的に減少させる。電波が、少し離れた移動物体で反射してから放射点に戻ってくると、その瞬時周波数はその瞬間に放射される電波とは異なるものになる。その差

は、物体までの距離と、その相対的な視線速度という2つの要因によって生じる。周波数の差を電子的に測定することにより、物体までの距離と物体の速度を同時に計算することができる (図3)。

チャープ式レーダーから着想を得たFMCWライダは、複数の異なる方法で実装することができる。最もシンプルな設計では、対象物を照射する光のビーム強度をチャープ変調することができる。この周波数には、FMCWレーダーの搬送波周波数と同じ法則(ドップラー効果など)が適用される。返ってきた光は、光検出器によって検出され、変調周波数が復元される。出力を増幅し、局部発振器によってミキシングすることで、周波数シフトを測定し、そこから対象物の距離と速度を計算することができる。

ただし、FMCWライダには制約がある。ToFライダと比べると、より高い演算能力が必要で、そのために完全な3Dサラウンドビューを生成するのに時間がかかる。また、測定精度は、チャープ傾斜の線形性に大きく依存する。

機能的なライダシステムの設計は困難をとまなうが、どの課題も乗り越えられないものではない。研究の進歩にとまなない、組み立てラインから送り出される自動車の大多数が完全自律走行車となる時代に、私たちは少しずつ近づいている。

参考文献

- (1) J. Wojtanowski et al., Opto-Electron. Rev., 22, 3, 183-190 (2014).

著者紹介

スワヴォミール・ピョンテク (Slawomir Piatek) は、米ハママツ・コーポレーション社のリサーチ・サイエンティスト、ジェイク・リー (Jake Li) は同社マーケティング・エンジニア。
e-mail: jli@hamamatsu.com
URL: www.hamamatsu.com